УДК 681.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛАБО ФОРМАЛИЗУЕМЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ

М.П. Силич

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: silich@fet.tusur.ru

Рассматриваются вопросы формирования слабо формализуемых, так называемых, оценочных зависимостей в составе модели функциональных отношений и их использования для оценки состояния объекта и определения влияния отдельных атрибутов на обобщенную оценку объекта. Приводятся результаты использования предлагаемого подхода для анализа уровня энергосбережения региона и определения приоритетных мероприятий по развитию энергосберегающего бизнеса.

Введение

Модель функциональных отношений – удобное средство для агрегирования различных форм представления знаний (продукционной, фреймовой или объектно-ориентированной) с традиционными процедурами при решении широкого круга задач диагностики, прогнозирования и оптимального проектирования. Методика построения и использования модели функциональных отношений, являющаяся частью технологии объектно-ориентированного моделирования сложных систем [1–3], предполагает формирование сети функциональных зависимостей между атрибутами классов, описывающих отдельные сущности моделируемой системы. Функциональные зависимости, отражающие каузальные отношения типа "причина-следствие", "средство-цель" или "аргумент-функция", задаются в виде совокупности правил-продукций с нечеткой импликацией, содержащих текущие значения (области значений) атрибутов-аргументов, а также аналитические формулы и произвольные процедуры-функции. Посредством сети функциональных отношений можно связать атрибуты, являющиеся первичными, непосредственными характеристиками, описывающими конкретное состояние объекта, через промежуточные атрибуты с целевыми атрибутами, являющимися показателями эффективности и качества. Методы прямого и обратного вывода позволяют определять значения целевых атрибутов, соответствующие заданным исходным данным, а также находить комбинации значений первичных атрибутов, приводящие к заданным значениям целевых атрибутов.

В случае, когда знания о моделируемом объекте слабо формализуемы, разработчику не всегда удается полностью определить вид для каждой из функциональных зависимостей. Зачастую ему известно, что изменение значений атрибутов-аргументов влечет за собой изменение значения атрибута-функции, но характер изменения полностью не определен: можно говорить лишь об относительных степенях влияния атрибутов-аргументов (в баллах от 0 до 1), определяющих степень изменения значения атрибута-функции. Примерами таких оценочных отношений являются: зависимость уровня достижения глобальной цели от степени достижения целей по различным аспектам (экономическому, социальному, политическому и др.); зависимость достижения цели от того или иного курса действий (стратегии); зависимость степени реализации стратегии от выполнения тех или иных мероприятий и т.д. Наиболее распространенным методом, используемым для принятия решений на основе подобных оценочных суждений, является метод анализа иерархий [4]. Метод позволяет определить степень влияния каждого из атрибутов на атрибут, являющийся корнем иерархии. Однако с его помощью нельзя определить уровень достижения целевого атрибута при заданном начальном состоянии атрибутов. Кроме того, метод анализа иерархий нельзя использовать в условиях, когда наряду с оценочными зависимостями используются функциональные зависимости другого типа.

В данной статье рассматриваются вопросы формирования слабо формализуемых, так называемых, оценочных зависимостей в составе модели функциональных отношений и их использования для оценки состояния объекта (системы, подсистемы, элемента) и определения влияния отдельных атрибутов на обобщенную оценку объекта.

Модель функциональных отношений

Модель функциональных отношений включает множество атрибутов $A=\{a_i\}$, описывающих предметную область, и множество отношений зависимости между атрибутами. Для каждого атрибута a_i задано: имя атрибута, тип (<String>, <Real>, <Integer>, ...) и множество значений (домен) $D(a_i)=\{d_k\}$. Домен задается в зависимости от типа атрибута. Например, для атрибута типа <Real> или <Integer> – в виде интервала, для атрибута типа <String> – в виде списка строк. Значения атрибутов являются нечеткими величинами, задаваемыми как одноточечные (одноэлементные) нечеткие множества. Таким образом, текущее значение $d(a_i)$ атрибута a_i характеризуется фактором уверенности $cf(d(a_i)\in[0;1]$.

На множестве атрибутов устанавливаются отношения функциональной зависимости $R^{fd}=(a_0,a_1,...,a_n)\in A\times...\times A$, для которых справедливо $(a_1,...,a_n)R^{fd}a_0$, т.е. a_0 является функцией атрибутов $a_1,...,a_n$.

Графически модель функциональных отношений можно представить в виде направленной сети без циклов, вершинами которой являются атрибуты, а дугами – функциональные зависимости между атрибутами (рис. 1).

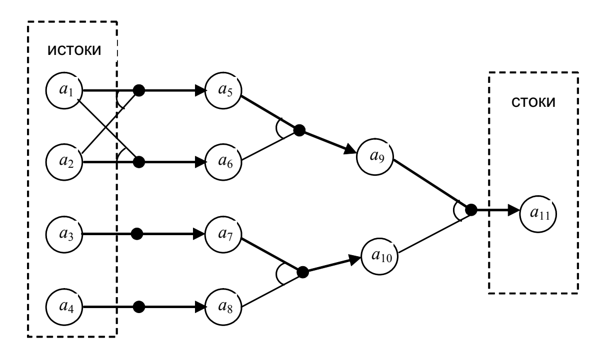


Рис. 1. *Сеть функциональных зависимостей атрибутов*

В истоках сети находятся так называемые базовые атрибуты, значения которых не зависят от значений других атрибутов. Остальные атрибуты непосредственно или опосредованно зависят от базовых. В стоках дерева располагаются, так называемые, целевые атрибуты, значения которых определяют целевое состояние системы.

Вид функциональной зависимости атрибута-функции a_0 от атрибутов-аргументов $a_1,...,a_n$ можно записать в виде совокупности m конъюнктивных правил Rl_k вида:

$$Rl_k : (d(a_1) \in D_k(a_1)) \& \ldots \& (d(a_n) \in$$
$$\in D_k(a_n)) \to (d(a_0) = f_k(a_1, \ldots a_n)) / cf(Rl_k),$$

где $d(a_i)$ – текущее значение атрибута a_i; $D_k(a_i) \subseteq D(a_i)$ – допустимая область атрибута a_i; $f_k(a_1,...,a_n)$ – функция, представленная либо в виде конкретного значения, либо в виде формулы, либо в виде некоторой процедуры-функции; $cf(Rl_k) \in [0;1]$ – фактор уверенности правила.

Правило имеет смысл: "ЕСЛИ атрибут a_1 принимает значение из области $D_k(a_1)$ И ... И атрибут a_n принимает значение из области $D_k(a_n)$ ТО атрибут a_0 принимает значение функции $f_k(a_1,...,a_n)$ с уверенностью $cf(Rl_k)$" .

В условной части правила области значений для атрибутов с текстовыми значениями задаются перечислением значений, для количественных параметров – в виде интервалов. Допустимая область может состоять из одного значения и, наоборот, совпадать со всей областью определения атрибута (атрибут может принимать любое значение), а также может быть задана в виде дизъюнкции допустимых подобластей. Условная часть может вообще отсутствовать.

Активизации правила осуществляется в случае, если текущие значения атрибутов-аргументов входят в допустимые области значений, указанные в условиях правила. Агрегация условий происходит по правилу минимизации, активизация заключения – по правилу минимизации или алгебраического произведения.

Отношения оценочной зависимости

Выделим специальный вид отношений функциональной зависимости – отношение оценочной зависимости (*estimated dependence*) R^{ed}, для которого выполняются следующие условия:

1. Все атрибуты, связанные данным отношением, имеют тип <Real> и их домены представляют собой интервал [0;1], т.е. атрибуты измеряются не на шкале абсолютных значений, а на шкале относительных значений в виде балльных оценок от 0 до 1.
2. Функция $f_k(a_1,...,a_n)$ в заключительной части правил-продукций задается в виде взвешенной суммы значений атрибутов-аргументов:
$$d(a_0) = v_1 \cdot d(a_1) + \ldots + v_n \cdot d(a_n),$$
где $v_i \in [0;1]$ – степень влияния i-ого атрибута-аргумента на атрибут-функцию, отражающий вклад i-го атрибута в значение атрибута-функции. Т.о. предполагается, что все влияния аргументов на функцию только положительны. Этого легко добиться заменой атрибутов-аргументов, оказывающих отрицательное влияние, противоположными по смыслу атрибутами.
3. Сумма степеней влияния аргументов равна единице: $\sum_{i=1}^{n} v_i = 1$.

Для определения степеней влияния атрибутов-аргументов на атрибут-функцию может быть использован любой из методов определения субъективных предпочтений. Наибольшее распространение получили следующие методы: непосредственной оценки, ранжирования, парных сравнений и последовательного сравнения [5]. Экспериментальная сравнительная оценка этих методов показала, что они приводят к близким результатам. При этом методом, требующим минимальных трудозатрат, является ранжирование, а наиболее трудоемким – метод последовательного сравнения. В случае, если в определении степеней предпочтений участвует группа экспертов, после выявления индивидуальных предпочтений осуществляется обработка результатов для получения групповой оценки предпочтений и количественной оценки степени согласованности экспертов.

Выявленные степени влияния атрибутов-аргументов подставляются в качестве весовых коэффициентов в формулу аддитивной свертки, используемую для вычисления значения атрибута-функции. При этом оценка согласованности мнений экспертов интерпретируется как фактор уверенности правила. В общем случае для одного отношения оценочной зависимости может быть сформировано несколько правил, отличающихся условиями, а также степенями влияния (весами). Причем одним и тем же условиям могут соответствовать различные заключения (формулы), полученные в результате применения разных методов или в результате опроса разных групп экспертов.

В процессе логического вывода значения атрибутов-аргументов оценочной зависимости либо задаются пользователем (если это базовые атрибуты), либо вычисляются с помощью других отношений функциональной зависимости. При этом изначально соответствующие атрибуты могут измеряться на

некоей предметной шкале, т.е. шкале абсолютных значений. Поскольку все атрибуты, связанные отношением оценочной зависимости, измеряются на универсальной шкале [0;1], встает вопрос, каким образом осуществлять переход от предметной шкалы к универсальной. Для этого можно воспользоваться подходом, описанным в [6] и предполагающим построение функций отображения.

Предметная шкала для атрибутов типа <Integer> или <Real> представляет собой числовую шкалу, а для атрибутов типа <String> – шкалу наименований. В модели функциональных отношений между атрибутом a_i, измеряемым на предметной шкале, и соответствующим атрибутом a_j, входящим в оценочную зависимость и измеряемым на универсальной шкале, устанавливается отношение функциональной зависимости. Зависимость задается правилом с пустой условной частью и с заключением, содержащим процедуру перехода от предметной шкалы к универсальной на основе заданной функции отображения π (для перехода с числовой шкалы) или функций принадлежности μ_1, μ_2, ... (для перехода со шкалы наименований).

Функции отображения π: $D(a_i)\rightarrow[0;1]$ строятся на основе опроса экспертов. Сначала на предметной шкале необходимо задать нижний и верхний "пороги безразличия" $d_{\min}$ и $d_{\max}$. Все значения меньше $d_{\min}$ отображаются в нулевое значение на универсальной шкале. Соответственно все значения больше $d_{\max}$ отображаются в 1,0 на универсальной шкале. На отрезке от $d_{\min}$ до $d_{\max}$ функция может быть линейной, кусочно-линейной или произвольного вида. На рис. 2 приведены примеры функций отображения различного вида.

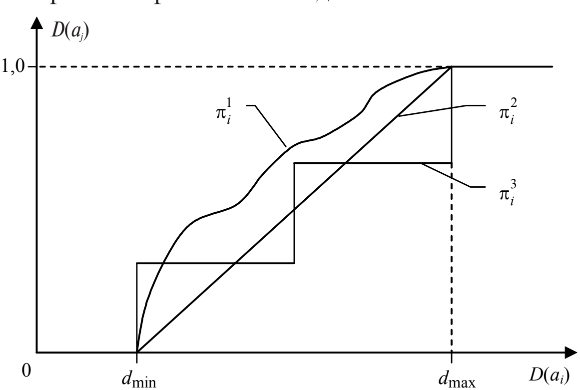


Рис. 2. *Функции отображения*

Для перехода со шкалы наименований на универсальную шкалу можно воспользоваться процедурой дефаззификации [7]. Для каждого из лингвистических значений $d_k\in D(a_i)$ строится функция принадлежности μ_{d_k} на универсальной шкале. Можно воспользоваться наиболее распространенными S-образными, Z-образными и П-образными типами функций принадлежности (рис. 3).

В качестве процедуры дефаззификации можно использовать любой из известных методов – центра тяжести, центра площади, левого или правого модального значения [7].

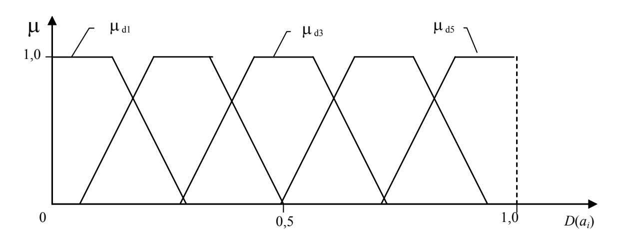


Рис. 3. *Функции принадлежности*

Расчет по модели осуществляется с помощью алгоритма прямого вывода на сети функциональных отношений [1]. При решении задачи интерпретации, т.е. вычисления значения некоторого целевого атрибута при заданных значениях базовых атрибутов, пользователем задаются значения атрибутов, стоящих в истоках сети. Сначала находится, так называемый, "путь вывода" – цепочка атрибутов, являющихся целями вывода на каждом шаге процесса нахождения решения. Затем последовательно перебираются атрибуты из "пути вывода" и для каждого из них определяются нечеткие значения по каждому из активных правил. Вывод заканчивается, когда будет вычислен заданный целевой атрибут. В случае, если определено несколько значений с различными факторами уверенности, для получения четкого значения может быть применена процедура дефаззификации по методу центра тяжести для одноточечных множеств. Процесс вывода, таким образом, осуществляется аналогично выводу по алгоритму Сугено [7].

Рассмотрим решение задачи определения оценки влияния некоторого базового атрибута на целевой атрибут при условии, что все функциональные зависимости в модели функциональных отношений являются оценочными зависимостями. При вводе исходных данных значение заданного базового атрибута принимается равным четкой единице, значения остальных – четкому нулю. Далее методом прямого вывода определяется значение целевого атрибута, интерпретируемое, как оценка влияния на него заданного базового атрибута. Процесс вывода при этом аналогичен процессу вычисления глобального приоритета методом анализа иерархий Саати, за исключением того, что кроме собственно оценки определяется ее фактор уверенности.

Использование отношений оценочной зависимости для решения задач в сфере энергосбережения

Рассмотренный метод формирования и использования оценочных зависимостей был применен при формировании программы повышения энергетической эффективности на территории Томской области на 2004–2008 гг. на этапе анализа уровня энергосбережения региона и на этапе разработки основных направлений программы. Для проведения анализа была сформирована система измеримых показателей, характеризующих состояние дел в сфере энергопотребления, т.е. составлены классы описаний в виде множества атрибутов. Примеры показателей:

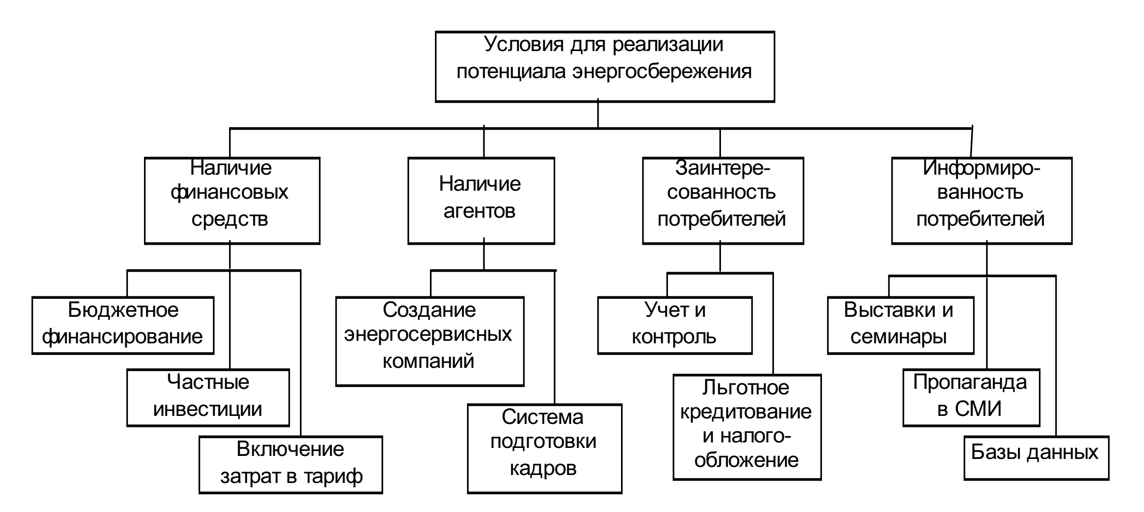


Рис. 4. *Фрагмент иерархии "средство-цель"*

– удельное потребление энергоресурсов на единицу валового регионального продукта (грамм условного топлива на руб.);
– прирост ежегодного потребления энергоресурсов по сравнению с предыдущим годом (%);
– удельное потребление энергоресурсов на душу населения (грамм условного топлива на чел.);
– доля энергоресурсов, выработанных на территории области, в общем объеме потребленных энергоресурсов (%).

Поскольку все исходные показатели измеряются на предметных шкалах (числовых), для каждого из них была определена функция отображения, позволяющая определить значение соответствующего "оценочного" атрибута, измеряемого на универсальной шкале. Для всех функций отображения использовалась S-образная форма с линейной зависимостью на промежутке между нижним и верхним "порогами безразличия".

Зависимость интегральной оценки уровня энергосбережения региона от "оценочных" атрибутов, соответствующих исходным показателям, описывается оценочной зависимостью. Для определения степеней влияния каждого из атрибутов на оценку уровня было решено использовать метод ранжирования. Анкетирование группы экспертов из четырех человек позволило выявить 4 индивидуальных ранжировки, которые были представлены в виде матриц парных сравнений. Затем была построена медиана – такая матрица парных сравнений, сумма расстояний от которой до всех матриц парных сравнений, полученных экспертами, является минимальной. На основе матрицы, соответствующей медиане, были выявлены нормализованные балльные оценки предпочтений. Степень согласованности экспертов определялась через коэффициент конкордации.

Построенная модель использовалась для сравнительной оценки уровня энергосбережения на территории Томской области с уровнем других регионов и для оценки динамики изменения уровня на протяжении последних пяти лет.

На этапе разработки основных направлений программы повышения энергоэффективности была построена иерархия, отражающая причинно-следственные зависимости между атрибутами по типу "средство-цель". Каждому атрибуту соответствует некоторая задача, которая не может быть решена, пока не будут решены ее подчиненные подзадачи. Атрибуты измеряются в баллах, отражающих степень решения соответствующей задачи. На рис. 4 представлен фрагмент иерархии. Целевым атрибутом является "Условия для реализации потенциала энергосбережения". Выделены четыре основные условия – наличие финансовых средств на реализацию проектов по энергосбережению; наличие агентов, способных разрабатывать и реализовывать проекты; заинтересованность потребителей в снижении энергопотребления и информированность потребителей относительно возможностей энергосбережения. Для каждого из атрибутов, соответствующих этим условиям, были выделены подчиненные атрибуты, обеспечивающие их выполнение, которым, в свою очередь, также сопоставлены доминируемые атрибуты и т.д.

Зависимость атрибута любого уровня (кроме нижнего) от непосредственно подчиненных ему атрибутов описывается оценочной зависимостью. Для определения степеней влияния подчиненных атрибутов использовался метод парных сравнений. Обработка матриц парных сравнений, содержащих степени превосходства атрибутов друг над другом, заключалась в вычислении собственных векторов матриц и их нормализации.

Построенная модель использовалась для определения оценки влияния мероприятий, находящихся на нижнем уровне иерархии, на целевой атрибут. Вычисленные приоритеты мероприятий применялись также для определения очередности их реализации и распределения финансовых средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силич М.П. Системная технология: объектно-ориентированный подход. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 224 с.
2. Силич В.А., Силич М.П. Метод объектного моделирования для проектирования сложных систем // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 4. – С. 14–21.
3. Силич В.А., Силич М.П. Проектирование сложной системы на основе объектно-ориентированного подхода // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 2. – С. 99–103.
4. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
5. Евланов Л.Г. Теория и практика принятия решений. – М.: Экономика, 1984. – 176 с.
6. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

УДК 553.06